

УДК 628.9.02

Юрій Семків<sup>1</sup>; Володимир Андрійчук<sup>1</sup>; Ярослав Осадца<sup>1</sup>; Валерій Касеркевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

<sup>2</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка, Україна

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

Розроблено математичну модель для розрахунку світлового забруднення атмосфери, що враховує кількість населення міста, кількість та типи світильників, світловіддачу ламп, площу освітленої частини міста.

*Ключові слова:* світлове забруднення, нічне небо, яскравість, джерела світлового забруднення

**Yuriy Semkiv; Volodymyr Andriychuk; Yaroslav Osadtsa; Valeriy Kaserkevych**

## MATHEMATICAL MODELING OF ATMOSPHERE LIGHT POLLUTION

The mathematical model for calculation of light atmospheric pollution was developed. This model takes into account the city population, number and types of fixtures, light output of lamps, area of the illuminated part of the city.

*Key words:* light pollution, night sky, brightness, sources of light pollution

Явище світлового забруднення виникає внаслідок напрямленого вгору штучного світла. Світлове забруднення – освітлення нічного неба штучними джерелами світла, світло яких розсіюється в нижніх шарах атмосфери. Іноді це явище також називають світловим смогом. Основними джерелами світлового забруднення є великі міста і промислові комплекси. На більшості обсерваторій яскравість неба в 22,5<sup>m</sup>/кв. секунди ( $10^{-4}$  кд/м<sup>2</sup>) вважається чудовою. Яскравість неба, як і слабких протяжних об'єктів, можна виражати в світлових, енергетичних одиницях – застосовується в звичайних фотометричних розрахунках та астрофізичних (зоряних величинах на квадратну секунду mag/sec<sup>2</sup>) – використовується тільки в астрофізиці. Середнє значення яскравості фону темного неба складає приблизно 21,5 (mag/sec<sup>2</sup>), що відповідає інтенсивності –  $2,5 \cdot 10^{-3}$  квант/см<sup>2</sup>·с· кв сек дуги ( $1,6 \cdot 10^{-6}$  квант/см<sup>2</sup>·с· кв сек дуги).

Існують такі основні моделі світлового забруднення:

**- фотометрична статистична модель світлового забруднення:**

$$V = 29 + 0.02 \cdot r + 2.5 \cdot \log(r^2/N); \quad (1)$$

де V – яскравість в зеніті в (mag/sec<sup>2</sup>); r – віддаль від населеного пункту в км.; N – число жителів.

**- модель Уолкера:**

$$I=0,01 \cdot N \cdot r^{-2,5}; L=11300000 \cdot N \cdot R^{-2,5}, \quad (2)$$

де  $I$  – % перевищення світлового забруднення над фоном неба;  $L$  – яскравість неба в зеніті в наноламбертах (нЛб);  $R$  – віддаль в метрах.

**-модель Шейфера**

$$m_{\max} = 8,68 - 1,2k_v - 5 \cdot \lg(1 + 0.158B^{1/2}), \quad (3)$$

де  $B$  – яскравість неба, нЛб в фотометричній полосі  $V$ ,  $k_v$  – коеф. екстинкції.

Недолік цих моделей полягає в тому, що не враховується метеоумови і тип освітлення міст. Тому пропонується модель, яка враховує кількість, типи джерел світла, їх світлотехнічні характеристики, а також кліматичні умови. Відповідно до цієї моделі енергетична яскравість  $L_v$  ((к-сть фотонів) / (см<sup>2</sup> · сек · стеррадіан)) , що засвічує атмосферу в зеніті розраховується за виразом:

$$L_v = Nph [1\text{лм}] \cdot 10^{-4} \cdot \delta \cdot \beta \cdot (1 + \delta_1) \left( \sum_{i=1}^{i=z} f_i \cdot N_i \cdot P_i \right) / (S \cdot 2\pi); \quad (4)$$

де  $S$  – площа освітленої частини міста, м<sup>2</sup>;  $\delta = 0,01 - 0,3$  – коефіцієнт, що враховує відбиття світла в атмосферу;  $\delta_1 = 0,1 - 0,4$  – коефіцієнт, що враховує попадання прямого світла в атмосферу;  $z$  – кількість типів ламп;  $f_i$  – світловіддача  $i$ -го типу лампи, лм/вт;  $N_i$  – кількість ламп даного типу;  $\beta$  – відношення освітленої до загальної площі міста;  $P_i$  – потужність електрична  $i$ -ї лампи, Вт;  $Nph [1\text{лм}] = Nph [1\text{Вт}] / 683 = 0,409 \cdot 10^{16}$  фот с<sup>-1</sup> – значення числа фотонів при  $\mu = 555$  нм за секунду в енергетичному потоці рівному 1/683 Вт, що на даній довжині хвилі відповідає світловому потоку в 1 лм.

Якщо відома яскравість земної поверхні  $L_z$ , то яскравість неба  $L_v$  (Кандела/м<sup>2</sup>) при зенітній висоті  $z$  становить:

$$L_v = L_z \cdot (1 - P_0^H \cdot M(z)) \cdot \beta / (1 + P_0^H \cdot M(z)), \quad (5)$$

або:

$$L_v = E \cdot \delta \cdot \beta \cdot (1 + \delta_1) \cdot (1 - P_0^H \cdot M(z)) / (\pi \cdot (1 + P_0^H \cdot M(z))); \quad (6)$$

де  $E$  – освітленість земної поверхні, лк;  $P = e^{-\lambda}$  – коефіцієнт прозорості;  $\lambda$  – коефіцієнт ослаблення світла, км<sup>-1</sup>;  $H_0 = 4-8$  км. – висота однорідної атмосфери;  $M(z) = \sec z$ .

Ослаблення блиску  $\Delta m$  (в зоряних величинах mag) зір з врахуванням світлового забруднення атмосфери:

$$\Delta m = \delta m - (2.5 \lg p)[M(z) - 1] - 2,5 \lg(1 + L/L_{\text{пр}}), \quad (7)$$

де  $\delta m$  – величина зенітного атмосферного поглинання в різних моделях атмосфери: в релеєвській моделі  $\delta m = 0.17^m$ , в фоновій моделі аерозоля  $\delta m = 0.26^m$ , в середній моделі  $\delta m = 0.34^m$ ;  $L_{\text{пр}}$  – природна яскравість неба: (10<sup>7</sup>/4π фотонів нм<sup>-1</sup>см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>) або 174 μcd/м<sup>2</sup>;  $L$  – яскравість неба від штучної засвітки;  $P$  – коеф. прозорості атмосфери.